

## Die Welt der Eistrabanten Teil 1

# Eismonde von Jupiter und Saturn

ROLAND WAGNER

*Seit 40 Jahren erforschen wir die Eismonde im äußeren Sonnensystem, beginnend mit den beiden Voyager-Sonden, vorerst endend mit New Horizons. Die Vielfalt dieser Körper, die mögliche Existenz von verborgenen Ozeanen und ihr Kryovulkanismus machen sie zu äußerst spannenden Himmelskörpern. Teil 1 dieses Zweiteilers stellt die Eismonde von Jupiter und Saturn vor.*

Die ersten detaillierten Aufnahmen der vier Galileischen Monde Io, Europa, Ganymed und Callisto gelangen 1979 mit der Raumsonde Voyager 2. Doch 20 Jahre vorher war die Vermutung aufgekommen, dass auf ihren Oberflächen Wassereis vorkommen könnte. Anfang der 1970er Jahre konnten schließlich erstmals Absorptionsbanden von H<sub>2</sub>O-Eis auf einigen dieser Körper nachgewiesen werden [1]. Verglichen mit den überwiegend aus Silikaten und Metallen zusammengesetzten terrestrischen Planeten des

▲ **Lineare Doppelgräben auf dem Jupitermond Europa könnten gefrorene Überreste von kryovulkanischer Aktivität sein. Die blaue Oberfläche besteht aus fast reinem Wassereis, die Zusammensetzung der dunklen, bräunlichen Flecken und Grate ist nicht klar. Sie könnten Verdunstungsprodukte wie Mineralsalze in einer Matrix mit hohem Wassergehalt enthalten.**

inneren Sonnensystems einschließlich des Erdmondes, die mittlere Dichten von 3344 bis 5515 kg/m<sup>3</sup> besitzen, weisen diese Monde mittlere Dichten von weniger als 2000 kg/m<sup>3</sup> auf – abgesehen von Europa (Tabelle 1) [1, 2]. Für diese Jupitersatelliten wurde daher der Begriff Eismonde geprägt.

Eine Ausnahme bildet Io: Wassereis fehlt an seiner Oberfläche, und seine höhere Dichte [2] lässt auf einen den terrestrischen Planeten ähnlichen Körper schließen. Europa ist ein Mischtyp: Einerseits ist Eis an der Oberfläche nachweisbar [2], seine Dichte deutet aber auf einen höheren Silikat- und Metallanteil im inneren Aufbau hin. Absorptionsbanden von Wasser in Form von Eis und niedrige mittlere Dichten sind inzwischen von allen Monden der großen Planeten im äußeren Sonnensystem bekannt. Somit sind mit Ausnahme von Io (und mit Einschränkung auch von Europa) alle diese Objekte im engeren Sinn Eismonde.

*This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.*



Nach den beiden Voyager-Sonden waren es vor allem drei Missionen, mit denen die Eismonde untersucht werden konnten: die Jupitersonde Galileo (1995–2003), die Saturn-sonde Cassini mit der Titan-Landesonde Huygens (2004–2017) und New Horizons, die 2015 an Pluto und Charon vorbeiflog und seitdem weiter in den Kuiper-Gürtel vordringt (detaillierte Informationen zu den Missionen Galileo und Cassini finden Sie im Zusatztext, s. „Zusatzmaterial“ hinter der Literatur).

### Jupiters Eissatelliten

Abbildung 1 zeigt die sieben größten Monde im Sonnensystem im richtigen Größenmaßstab zueinander. Fünf dieser großen Monde sind Eissatelliten im äußeren Sonnensystem. Eine steigende Zahl sehr kleiner Eismonde mit Durchmesser unter 200 km wurden in den vergangenen Jahren bei astronomischen Beobachtungen entdeckt oder konnten bei erneuter Auswertung von Bilddaten nachgewiesen werden.

Abbildung 1 verdeutlicht ein wichtiges Charakteristikum dieser Objekte: Kein Mond gleicht in Farbe oder Oberflächenformen dem anderen. Diese Unterschiede fallen insbesondere bei den beiden größten, im Durchmesser dem innersten Planeten Merkur vergleichbaren Galileischen Satelliten Ganymed und Callisto auf, trotz ihrer annähernd gleichen Größe und ihrer benachbarten Bahnen um Jupiter (Tabelle 1).

Die Oberfläche von Callisto erscheint in Echt- und Falschfarbenaufnahmen – letztere unter Verwendung von Farbfiltern im nahen Infraroten – weitgehend dunkel bis dunkelbraun und ist übersät mit Flecken unterschiedlicher Helligkeit, die Einschlagskrater repräsentieren [3]. Die Helligkeit eines Kraters ist ein Hinweis auf dessen Alter: Je dunkler er erscheint, desto älter ist er. Wie auf dem Erdmond sind die hellen und damit jüngsten Krater oftmals

gekennzeichnet durch radiale Strahlen, die das nachfolgende Bombardement von Mikrometeoriten noch nicht auslöschen konnte.

Ganymed weist wie Callisto ebenfalls Krater unterschiedlicher Helligkeit auf (Abbildung 1). Anders als Callisto ist der größte Mond im Sonnensystem aber durch zwei unterschiedliche geologische Einheiten gekennzeichnet [3, 4]. Etwa ein Drittel der Oberfläche nehmen dunkle, dicht bekraterte Ebenen ein, der Rest ist tektonisch geprägt durch ein Netzwerk engständiger paralleler Rillen. Diese Gebiete wurden nach den Voyager-Vorbeiflügen als Grooved Terrain, also gefurchtes Terrain, bezeichnet [5, 6] (Abbildung 2).

Abbildung 3 zeigt die geologischen Haupteinheiten auf Ganymed und Callisto in gleicher Auflösung von 150 m/Bildpunkt zum Vergleich: Die dunklen Kraterebenen auf Ganymed (oben) und Callisto (unten) sowie helles Gebiet auf Ganymed, sind weitgehend glatt oder mit tektonischen Rillen (Mitte) durchzogen. Neben einer Vielzahl von Kratern sind die dunklen Ebenen auf Ganymed geprägt durch Erosions- und Abtragungsformen, erkennbar an Kratern in unterschiedlichen Erhaltungszuständen sowie an gravitativen Massenbewegungen und Ablagerungen dunklen Materials in topographisch tief gelegenen Gebieten [3, 4]. Lokal können vereinzelte oder auch Schwärme von Dehnungsbrüchen auftreten (Abbildung 3 oben). Sublimationsprozesse, vorwiegend von  $\text{H}_2\text{O}$ , an den sonnenabgewandten Hängen in Kratern oder Furchen, führten zur Entstehung eines dunklen eisärmeren Rückstandes, der sich an tieferen Stellen ansammelt [3, 4]. Es wird vermutet, dass das dunkle

▲ **Abb. 1 Die sieben größten Monde im Sonnensystem in richtigem Größenverhältnis zueinander, aufgenommen mit den Raumsonden Galileo, Cassini und Voyager 2. Ganymed ist knapp größer als Titan.**





**Abb. 2** Detailaufnahme dunkler und heller Gebiete auf Ganymed, Bildauflösung 900 m/Pixel.

Material eine Schicht von einigen bis einigen zehn Metern Dicke auf dem helleren, eisreicheren Substrat bildet.

Die auf einer Planeten- oder Mondoberfläche befindlichen Einschlagskrater sind ein Maß für deren Alter: Je mehr Krater vorhanden sind, umso älter ist die Oberfläche. Altersabschätzungen der dunklen, dicht bekraterten Einheiten ergaben so, trotz hoher Unsicherheiten wegen der nicht genau bekannten Einschlagsraten im Jupitersystem, ein Alter von mindestens vier Milliarden Jahren [3, 4, 7].

Die hellen Einheiten bilden ein dichtes Netz von Zonen von mehreren 10 oder 100 km Breite, das die dunklen Gebiete in teilweise mehrere 100 km langen Bändern oder Sulci (lateinisch *Sulcus*: Rille, Furche oder Graben) voneinander trennt. Die hellen Gebiete sind entweder durch dicht stehende parallele Rillen gekennzeichnet oder weitgehend glatt [3, 4], wie in Abbildung 3 Mitte in höherer Auflösung gezeigt.

Insgesamt ist die Oberfläche von Ganymed in beiden geologischen Haupteinheiten flach, verglichen mit der viele Kilometer Höhenunterschied betragenden Topographie der terrestrischen Planeten wie Erde oder Mars. Auswertungen von Schattenlängen und Stereobildern ergaben,

dass Ganymeds Höhenunterschiede im Mittel nicht mehr als 1500 m betragen [3, 4].

Vermutlich dehnte sich Ganymed irgendwann in seiner Frühzeit, vor vielleicht zwei bis drei Milliarden Jahren, aus. Durch die Dehnung vergrößerte sich die Oberfläche und rief tektonische Dehnungskräfte hervor, durch welche die hellen Gebiete mit ihren Rillen entstanden [3, 4]. Hatte man nach Voyager noch vermutet, bei den hellen Gebieten sei Tektonik in Verbindung mit Vulkanismus im Spiel gewesen [3, 4] so zeigten die höher aufgelösten Aufnahmen der Galileo-Kamera nun, dass das alte dunkle Gebiet im Prinzip vollständig durch einen als Tectonic Resurfacing (tektonische Oberflächenüberprägung) bezeichneten Prozess in helle Gebiete mit intensiver tektonischer Überprägung umgewandelt wurde [3, 4]. Lediglich an einigen wenigen Stellen in den hellen Gebieten deutet die Existenz von Calderen auf möglichen Vulkanismus hin. Vermutlich kam es zur Eruption von Wasser in Verbindung mit weiteren flüchtigen Bestandteilen. Dieser auf mehreren Eismonden nachweisbare Prozess wird als Kryovulkanismus bezeichnet. Die Kraterhäufigkeiten sind in den hellen Einheiten niedriger als in den dunklen. Die hellen Gebiete entstanden somit später. Schätzungen gehen von einem Alter von etwa zwei Milliarden Jahren aus, möglich ist aber auch ein höheres Alter von drei Milliarden und mehr [4, 7].

Vergleicht man die dunklen Kraterebenen von Ganymed mit denen von Callisto (Abbildung 3 unten), so fällt die ähnlich hohe Kraterhäufigkeit ins Auge [7, 8]. Demnach ist Callistos Oberfläche ebenfalls mindestens vier Milliarden Jahre alt. Anders als Ganymed ist Callisto über die gesamte Oberfläche von einer schätzungsweise mehrere zehn Meter dicken Schicht dunklen Materials überzogen, die ein eisreicheres helleres Substrat überdeckt. Ähnlich wie bei Ganymed bildete sich dieses Material als Rückstand von Sublimationsprozessen, bei denen nicht nur H<sub>2</sub>O-Eis, sondern ein noch flüchtigerer Stoff, vermutlich CO<sub>2</sub>, im Substrat vorhanden ist. Dieser sublimiert unter der Sonneneinstrahlung mit einer höheren Rate als Wassereis [8]. Die Bildung von Einschlagskratern sowie Erosion und Abtragung durch Sublimation sind auf Callisto die geologischen Hauptprozesse [7, 8].

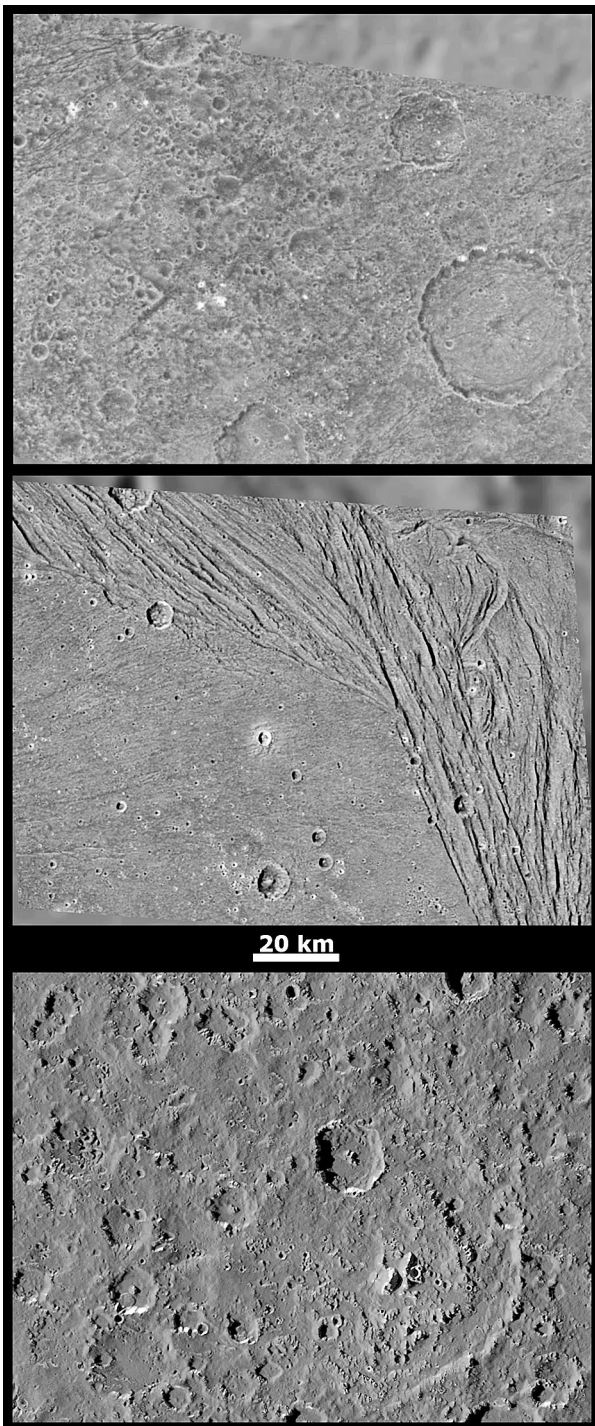
Die Oberfläche von Europa unterscheidet sich deutlich von der Ganymeds oder Callistos. Sie erscheint, wie Abbildung 1 zeigt, in niedriger räumlicher Auflösung und in Echtfarben überwiegend hell blaugrau, überlagert von bräunlichen Flecken und durchzogen von dunkleren, bräunlichen linearen Strukturen. In Abbildung 4 sind die beiden geologischen Haupteinheiten Europas bei gleicher Auflösung von 170 m/Pixel, aber unter zwei unterschiedlichen Sonnenständen im Vergleich dargestellt. Die hellen Ebenen sind durchzogen von einer Vielzahl linearer bis gekrümmter Rücken von meist nur wenigen hundert Metern Höhe, wie Schattenmessungen und Auswertungen von Stereobildern ergaben.

Die hellen Ebenen werden nach ihrer in den höher aufgelösten Galileo-Bilddaten erkennbaren Hauptgelände-

**TAB. 1** | PHYSIKALISCHE PARAMETER DER MONDE

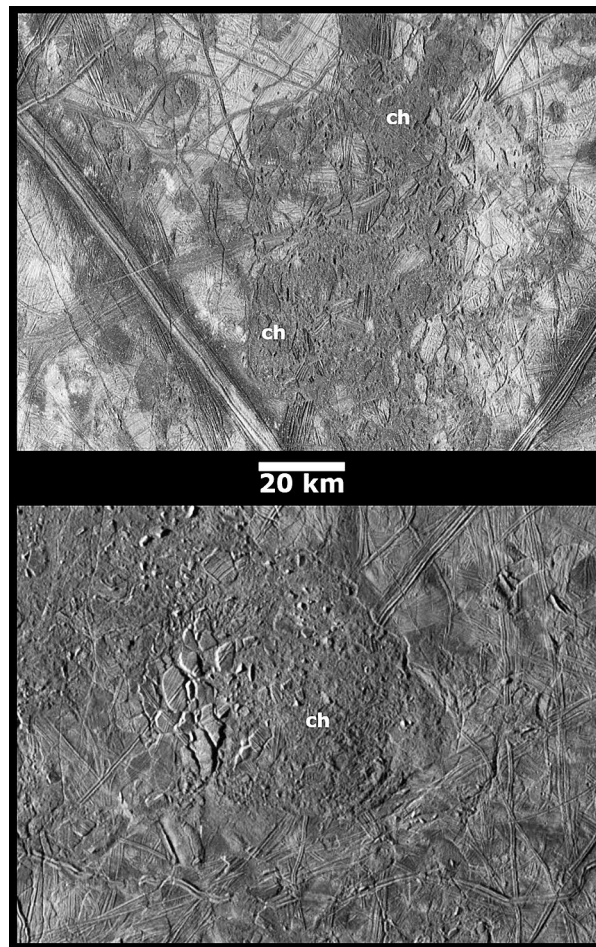
Eismond	Zentralplanet	Mittl. Durchmesser/km	Mittl. Dichte/kg/m <sup>3</sup>
Io	Jupiter	3642,9	3528
Europa	Jupiter	3124,2	3013
Ganymed	Jupiter	5264,7	1942
Callisto	Jupiter	4818,6	1834
Enceladus	Saturn	504,2	1606





**Abb. 3** Vergleich der geologischen Haupteinheiten auf Ganymed und Callisto bei höherer Auflösung von 150 m/Pixel. Oben: alte, dicht bekraterte dunkle Kraterebenen auf Ganymed; Mitte: helle Einheiten auf Ganymed mit tektonischen Rillen oder weitgehend glatt; unten: alte dunkle Kraterebenen auf Callisto.

form als Ridged Plains (zerklüftete Ebenen) bezeichnet. Häufigste Form in den Ridged Plains sind zwei zusammen wenige 100 m bis 4 km und mehr breite, unmittelbar nebeneinander liegende Rücken, getrennt von einer zentralen



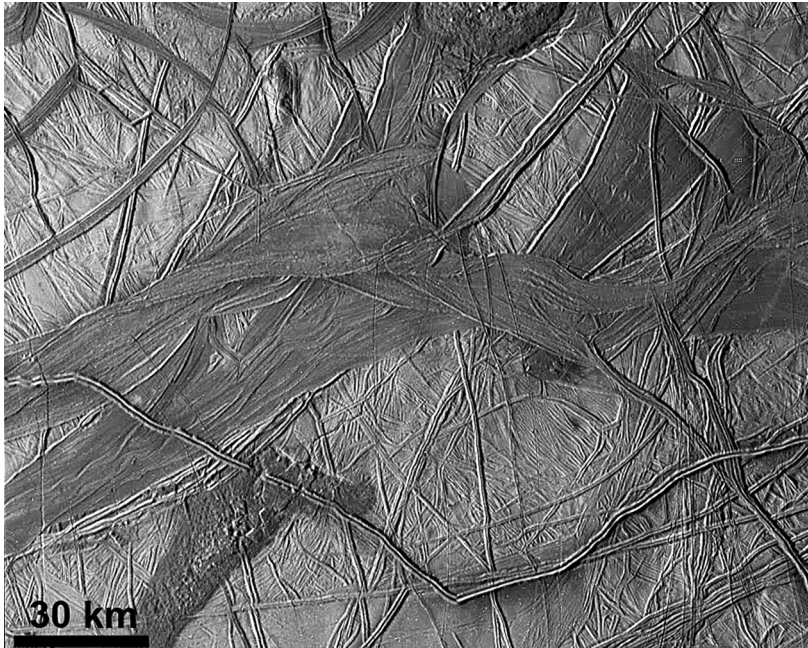
**Abb. 4** Die beiden geologischen Haupteinheiten der Oberfläche auf Europa. Lineare Strukturen, helle Ebenen und Chaos-Regionen (ch), aufgenommen bei unterschiedlichen Sonnenständen; Bildauflösung 170 m/Pixel. Oben hoher, unten niedriger Sonnenstand.

oder axialen Furche, den sogenannten Doppelrücken [3, 9]. Zusammen mit ebenfalls weit verbreiteten einfachen Rücken sind sie entweder, ähnlich den Rillen auf Ganymed, in strukturellen Zonen angeordnet oder durchziehen als markante einzelne Doppelrücken die Oberfläche mit Längen über mehrere 100 km bis über 1000 km. Bilder, die bei hohem Sonnenstand aufgenommen wurden, belegen, dass einige Doppelrücken von dunklen Ablagerungen umgeben sind (Abbildung 4 oben).

Die zweite geologische Haupteinheit auf Europa sind die Chaos-Regionen [3, 9] (in Abbildung 4 mit „ch“ bezeichnet). Sie bestehen aus zerbrochenen, in einer Art Matrix gegeneinander verschobenen oder rotierten Platten ursprünglicher Ridged Plains und sind somit erst nach den Ebenen entstanden. Bei niedrigem Sonnenstand erscheinen sie dunkler (Abbildung 4, oben), in Farbbildern bräunlich oder braun-orange.

Eine dritte häufige Geländeform sind dunkle Bänder [3, 9], wie im Detailbild in Abbildung 5 dargestellt. Diese Bänder sind entweder glatt oder zeigen Lineationen, also





**Abb. 5** Komplexe, dunkle, bis zu 100 km breite Bänder, teilweise keilförmig, welche die Ridged Plains überlagern und stellenweise von jüngeren Doppelspalten durchzogen sind. Die markantesten dieser Formen sind überwiegend auf der Jupiter abgewandten Hemisphäre Europas zu finden.

linienförmige Gefüge, parallel zu ihren Rändern. Sie können etwa 100–150 m höher als ihre Umgebung stehen und werden maximal 30 km breit [3, 9]. Abgesehen von lokalen Unterschieden sind die Bänder im Durchschnitt jünger als Doppellücken und Ridged Plains, aber älter als die Chaos-Regionen.

Die Anzahl der Einschlagskrater auf Europa ist auffallend gering, ein deutlicher Hinweis auf eine vergleichsweise junge Oberfläche. Abschätzungen des Alters ergeben je nach Impakt-Chronologiemodell ein Alter von nur 50 Millionen, maximal mehrere 100 Millionen Jahre [7].

Die Oberflächen von Ganymed, Callisto und Europa sind charakterisiert durch Absorptionsbanden von Wasser-eis im nahen Infrarot [1]. Die Tiefe der Absorptionsbanden gibt an, wie rein das Eis an der Oberfläche vorhanden ist und liefert zudem auch Informationen über beispielsweise Temperatur, Porosität, Korngröße oder Kristallinität des Eises. Sehr reines Eis ist in den hellen Ebenen Europas und Ganymeds vorhanden. In den dunkleren Einheiten Europas und vor allem in den dunklen Kraterebenen Ganymeds und Callistos sind flachere Absorptionsbanden ein Hinweis auf verunreinigtes Eis, vermutlich durch Beimengungen von Silikaten, Kohlenwasserstoffen oder Kohlendioxid [1].

Details, etwa die Form (Asymmetrie) der H<sub>2</sub>O-Absorptionsbanden, sind Indikatoren für Beimengungen anderer Materialien wie hydratisierter Magnesium- und Natriumsulfate [1]. Des Weiteren sind spektrale Signaturen für das Vorkommen von CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> in allen drei Eissatelliten vorhanden. Ein nicht nur für die Eissatelliten Jupiters, sondern für mehr oder weniger alle Eismonde und Objekte des

Kuiper-Gürtels jenseits der Neptunbahn charakteristischer Oberflächenbestandteil ist der Molekülbaustein C-N. Er kommt in den sogenannten Tholinen vor [1]. Das sind komplexe organische Moleküle aus Kohlenstoff, Stickstoff und Wasserstoff, die für die rot-braune Färbung dieser Eiskörper verantwortlich sind und durch UV-Bestrahlung der Oberflächen entstehen.

### Gravitation und Magnetfelder

Erkenntnisse darüber, wie die auf den drei Galileischen Eismonden nachweisbaren tektonischen und kryovulkanischen Prozesse – oder deren Fehlen – zu erklären sind, lieferte die Galileo-Mission mit Messungen der Gravitations- und Magnetfelder.

Bei nahen Vorbeifügen der Galileo-Sonde an den Satelliten konnte deren Gravitationsfeld und ihr Trägheitsmoment vermessen werden. Das für Ganymed ermittelte Trägheitsmoment von 0,3115 [10] entspricht einem ausgeprägt differenzierten Körper, dessen innerer Aufbau sich durch ein Dreischichtenmodell beschreiben lässt: ein Metall-Gesteins-Kern, umgeben von einem Gesteinsmantel und einer äußeren Schale aus Wasser und/oder Eis. Ähnliches gilt für Europa mit einem Wert von 0,346 [10]. Auch Europa ist differenziert in einen Metall-Gesteins-Kern, einen Gesteinsmantel – verglichen mit Ganymed mit deutlich höherem Anteil am Gesamtaufbau – und eine äußere Wasser-Eis-Schicht. Bei Callisto schließlich ergaben nahe Vorbeiflüge ein höheres Trägheitsmoment von 0,3549 [10]. Der zweitgrößte Jupitermond ist offenbar nur teilweise differenziert: in einen Gesteins-Eis-Kern, umgeben von Eismantel und Eiskruste mit einem geringeren Anteil von Gestein als der Kern.

Der innere Aufbau der drei Eissatelliten (Abbildung 6) gibt somit annähernd die Verhältnisse an der Oberfläche wieder: Während die nur teilweise Differenzierung Callistos einen geologisch auch in der Vergangenheit weitgehend inaktiven Körper widerspiegelt, steht der innere Aufbau von Ganymed und Europa und ihre daraus ableitbare thermale Geschichte, die diesen Aufbau zur Folge hatte, im Einklang mit den tektonischen und kryovulkanischen Geländeformen an ihren Oberflächen.

Überraschende Ergebnisse brachten Messungen des Magnetfeldes mit Hilfe des Magnetometers an Bord von Galileo. Bei Europa fand man deutliche Hinweise auf ein durch Jupiters Magnetosphäre und Plasma in der Umgebung induziertes Magnetfeld mit einer Feldstärke von etwa 200 nT, das nur durch die Existenz eines vermutlich salzhaltigen flüssigen „Ozeans“ nahe der Oberfläche erklärt werden kann [11, 12]. Die Dicke dieses Ozeans wird auf 100 bis 150 km geschätzt, flüssiges salzhaltiges Wasser könnte bereits wenige Kilometer unterhalb der Oberfläche existieren. Die in den Chaos-Regionen zerbrochenen und gegeneinander bewegten oder verstellten Platten der Ridged Plains lassen sich durch die Existenz eines Ozeans erklären. Unklar ist jedoch, ob es in den Chaos-Regionen zu einer Aufschmelzung bis zur Oberfläche kam oder ob

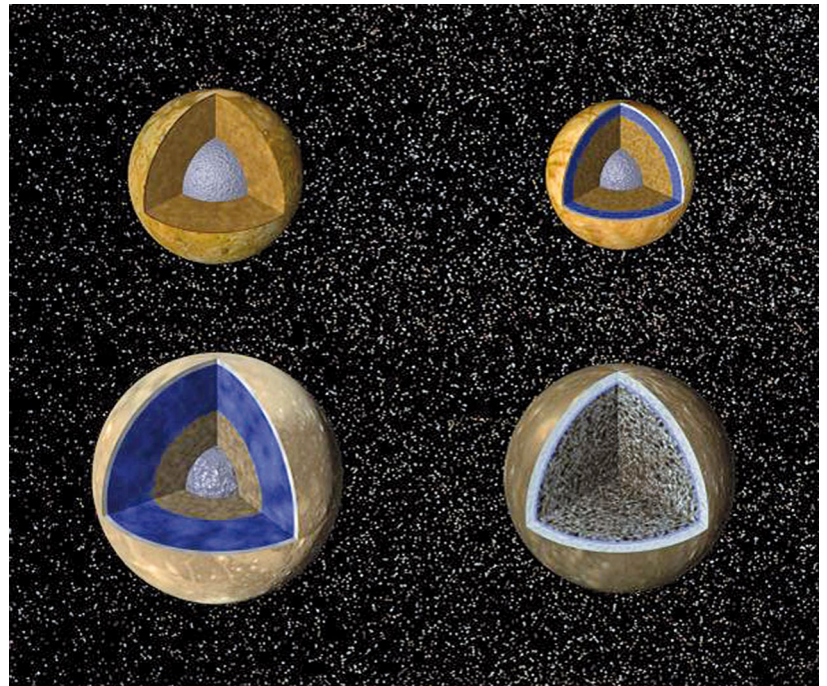
sich die Platten auf warmem, mobilem Eis über dem Ozean gegeneinander bewegt haben [3, 9]. Das Vorkommen hydratisierter Salze, wie sie in den Daten des abbildenden Spektrometers Galileo-NIMS an der Oberfläche nachweisbar sind, steht ebenfalls im Einklang mit der wahrscheinlichen Existenz eines Ozeans [12].

Ein induziertes Magnetfeld mit einer allerdings geringen Feldstärke von etwa 40 nT weist auch Callisto auf [11, 12] – überraschend angesichts der nicht vollständigen oder nur partiellen Differenzierung des zweitgrößten Jupitermondes. Allerdings wird vermutet, dass der hypothetische Callisto-Ozean anders als bei Europa in größerer Tiefe liegt und somit wenig Einfluss auf geologische Prozesse an der Oberfläche hatte.

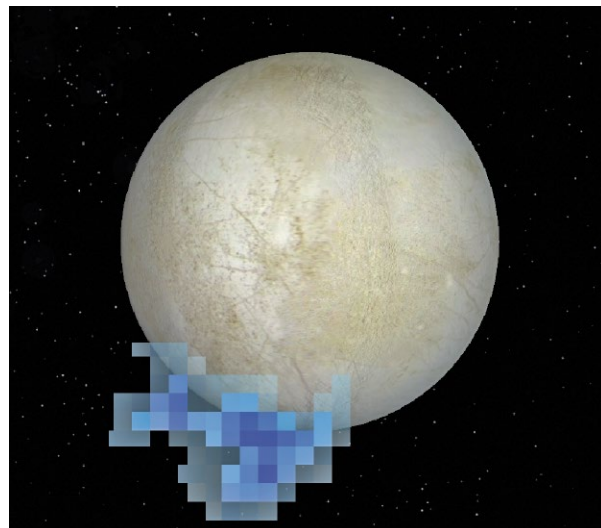
Ganymed hebt sich als einziger Mond durch eine Besonderheit hervor: Bei ihm konnte man mit den Magnetometerdaten ein Magnetfeld mit einer Feldstärke von circa 750 nT nachweisen [11, 12]. Dieses Feld wird durch einen Dynamo in einem vermutlich teilweise oder vollständig geschmolzenen Eisen- oder Eisen-Schwefel-Kern erzeugt. Bei Ganymed wird ebenfalls ein Ozean vermutet, dessen Nachweis durch Magnetfeldmessungen ähnlich wie bei Europa und Callisto jedoch nicht möglich ist. Das primäre Feld des Dynamos ist zu stark, um ein induziertes Magnetfeld zu messen [11, 12].

Die Herkunft der deutlichen Unterschiede in den thermalen und geologischen Entwicklungen der drei benachbarten Galileischen Eissatelliten Jupiters ist auch nach der Galileo-Mission nicht eindeutig gelöst. Die Suche nach den Ursachen wird im Fokus künftiger Missionen stehen. Der Unterschied zwischen dem geologisch weitgehend inaktiven Mond Callisto und dem zumindest in der Vergangenheit tektonisch aktiven Mond Ganymed könnte unter anderem in Unterschieden in der Anfangstemperatur des Materials bestehen, aus dem sich die Monde gebildet haben. In einer möglichen Akkretionsscheibe, die Jupiter anfänglich umgab und in denen sich die Monde bildeten, könnte von innen nach außen ein Temperaturgradient geherrscht haben. Ein höherer Silikatanteil mit einem entsprechenden Anteil radioaktiver Elemente könnte bei Ganymed zu umfassenderen Differenzierungsprozessen als bei Callisto geführt haben. Eine Erklärung für die Entstehung des Grooved Terrain auf Ganymed sind beispielsweise Phasenänderungen von Eis-Polymorphen im Inneren oder auch das (teilweise) Ausfrieren eines Ozeans, das eine Volumenvergrößerung und demzufolge eine Dehnung der Oberfläche zur Folge hatten [10].

Bei Ganymed und Europa kommen zusätzlich Gezeiteneffekte als Antriebsmechanismen für Tektonik und Kryovulkanismus in Frage. Ganymed, Europa und Io befinden sich in einer sogenannten Laplace-Resonanz: Ihre Umlaufdauern verhalten sich nach ganzzahligen Vielfachen im Verhältnis 1:2:4 von Io zu Ganymed [10, 13]. Aufheizung durch Gezeiten könnte somit in der Modifikation der Oberflächen eine Rolle spielen, insbesondere bei Europa. Für eine aktuelle kryovulkanische Aktivität fand man in den



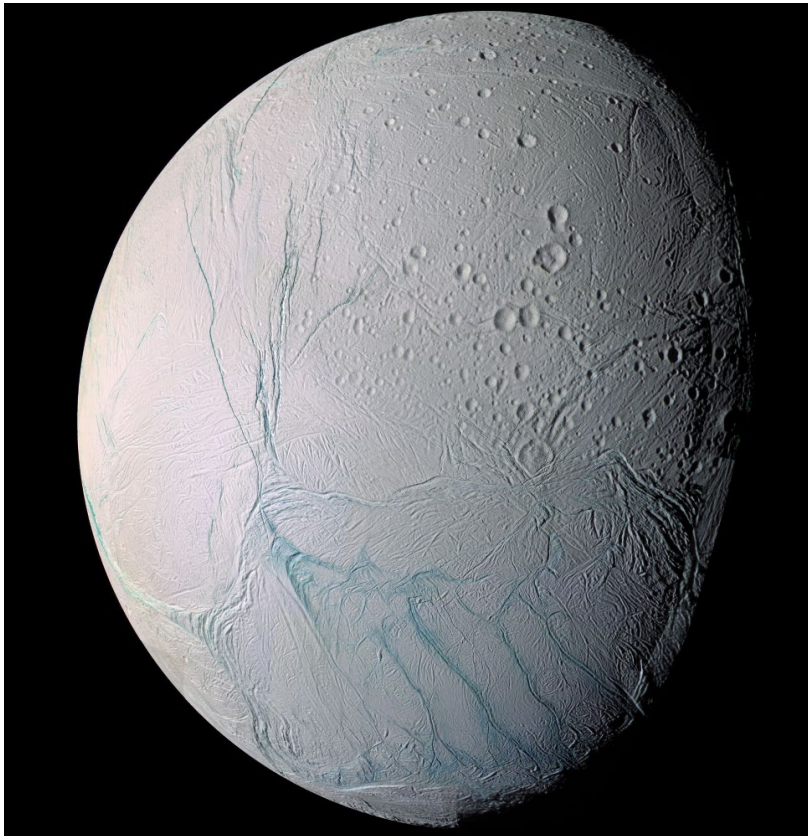
**Abb. 6** Innerer Aufbau der drei Eismonde Jupiters plus Io (blau: Eis). Oben: Io (links), Europa (rechts); unten: Ganymed (links), Callisto (rechts). Die Monde sind im richtigen Größenmaßstab zueinander dargestellt.



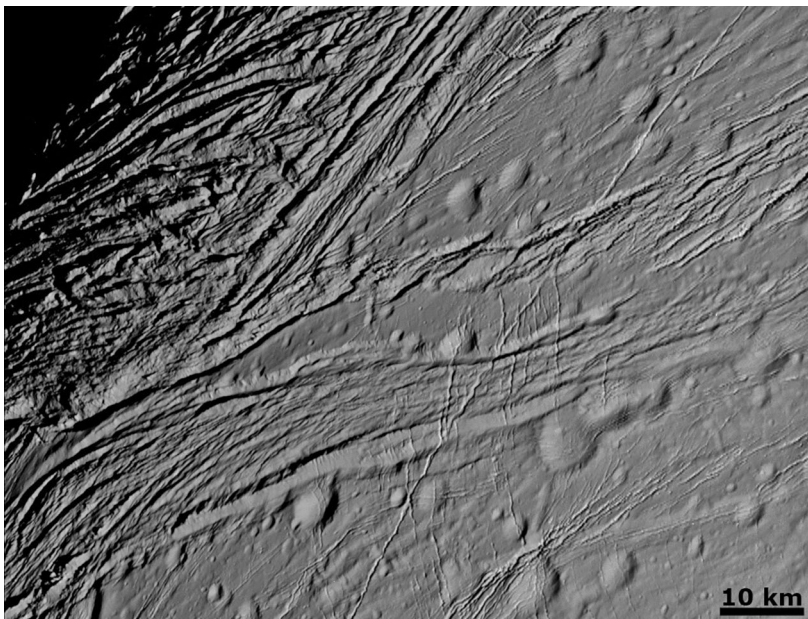
**Abb. 7** Kryovulkanische Aktivität in der Südpolregion Europas, nachgewiesen im Jahr 2012 mit dem Weltraumteleskop Hubble. Die Daten einer Eruption flüchtiger Bestandteile wie H<sub>2</sub>O-Eis wurden hier einer globalen Aufnahme überlagert.

Galileo-Kameradaten keine Hinweise [9]. Im Jahr 2012 wies das Weltraumteleskop Hubble erstmals eine mögliche Eruption von Wasserstoff und Sauerstoff in der Südpolregion nach [14] (Abbildung 7). Wenn sich ähnliche Messungen wiederholen lassen, wäre dies der Beweis, dass Europa nach dem weiter unten beschriebenen Saturnmond Enceladus der zweite kryovulkanisch aktive Eismond im Sonnensystem ist.





**Abb. 8** Globale Ansicht des Saturnmondes Enceladus mit alten, dicht bekraterten Gebieten an der Tag-Nacht-Grenze und jungen, kaum bekraterten tektonisch überprägten Gebieten.



**Abb. 9** Detailaufnahme der Oberfläche von Enceladus bei einer Auflösung von etwa 95 m/Pixel. Gezeigt ist das Nebeneinander von alten, dicht bekraterten Gebieten und tektonisch überprägten Regionen mit linearen Gräben und Bergrücken, in denen Krater vollständig fehlen. Die Entstehung von Bruchstrukturen und viskose Relaxation durch einen erhöhten Wärmefluss lassen insbesondere die großen älteren Krater allmählich verschwinden.

## Zukünftige Missionen

Im nächsten Jahrzehnt planen sowohl die NASA wie die ESA Missionen zu den Eissatelliten, schwerpunktmäßig zu Europa und Ganymed. Die Mission der NASA zu Europa, Europa Clipper genannt, soll zwischen 2022 und 2025 an den Start gehen und nach mehrjährigem Flug Jupiter umrunden. Insgesamt soll Europa Clipper Europa 45 Mal passieren und dabei bis auf 25 km an die Oberfläche herankommen. Neben einer Verbesserung der Bilddatenbasis und spektraler Daten zur Bestimmung und Kartierung von Mineralen an der Oberfläche sollen Messungen des Gravitationsfeldes und des Magnetfeldes noch genauere Informationen über Europas inneren Aufbau und über den Ozean liefern. Letzteres ist auch im Hinblick auf ein potenzielles exobiologisches Habitat interessant, das eventuell die Entwicklung primitiven Lebens ermöglichen würde.

Die ESA plant im Rahmen ihres Cosmic-Vision-Programms ebenfalls eine Mission zum Jupitersystem mit Namen JUICE: JUPITER ICy Moon Explorer. Der Start ist für Juni 2022 geplant. JUICE soll nach mehreren Gravity Assists an Venus, Erde und Mars im Oktober 2029 im Jupitersystem ankommen und den Planeten zunächst auf einer exzentrischen Bahn umkreisen. Dabei soll JUICE im Verlauf der beiden ersten zwei Jahre im Jupitersystem zweimal an Europa und mehrere Male an Callisto vorbeifliegen. Anschließend wird JUICE im September 2032 in eine Umlaufbahn um Ganymed einschwenken und den größten Mond des Sonnensystems auf Kreisbahnen bis zu einer minimalen Höhe von 200 km erforschen. Besonderes Augenmerk wird auch hier auf dem Nachweis der Ozeane im Inneren der drei Eismonde liegen.

## Der Saturnmond Enceladus

Die Instrumente an Bord der Raumsonde Cassini studierten Saturn und seine Monde zwischen 2004 und 2017 intensiv, die mitgeführte Sonde Huygens landete zudem auf dem Mond Titan. Die geologischen Prozesse auf den Oberflächen der Eismonde sind überaus vielfältig [3, 15]. Neben weitgehend durch Einschlagskrater geprägten Körpern wie Mimas, Iapetus, Hyperion oder Phoebe findet man auf Tethys, Dione und Rhea Anzeichen vergangener innerer Aktivität, vor allem in ihren Systemen von Bruchstrukturen [3, 15]. Zwei Trabanten fallen aus dem Rahmen: der größte Mond Titan mit seiner dichten Stickstoffatmosphäre, auf dessen Oberfläche Flüsse und Seen flüssiger Kohlenwasserstoffe nachgewiesen werden konnten, und Enceladus, der sich als kryovulkanisch überaus aktiv erwies [3, 15]. Auf ihn beschränken wir uns im Folgenden.

Enceladus ist dem Jupitermond Europa vergleichbar, obwohl er mit 504 km nur etwas weniger als ein Sechstel von dessen Durchmesser aufweist. Seine Oberfläche ist überzogen mit einer Vielzahl tektonischer Formen, linearer bis gekrümmter Bergrücken und Bruchstrukturen (Abbildung 8). Allerdings besteht ein wesentlicher Unterschied zu Europa: Auf Enceladus haben sich Gebiete mit einer hohen Kraterdichte erhalten, die vermutlich mehrere Mil-

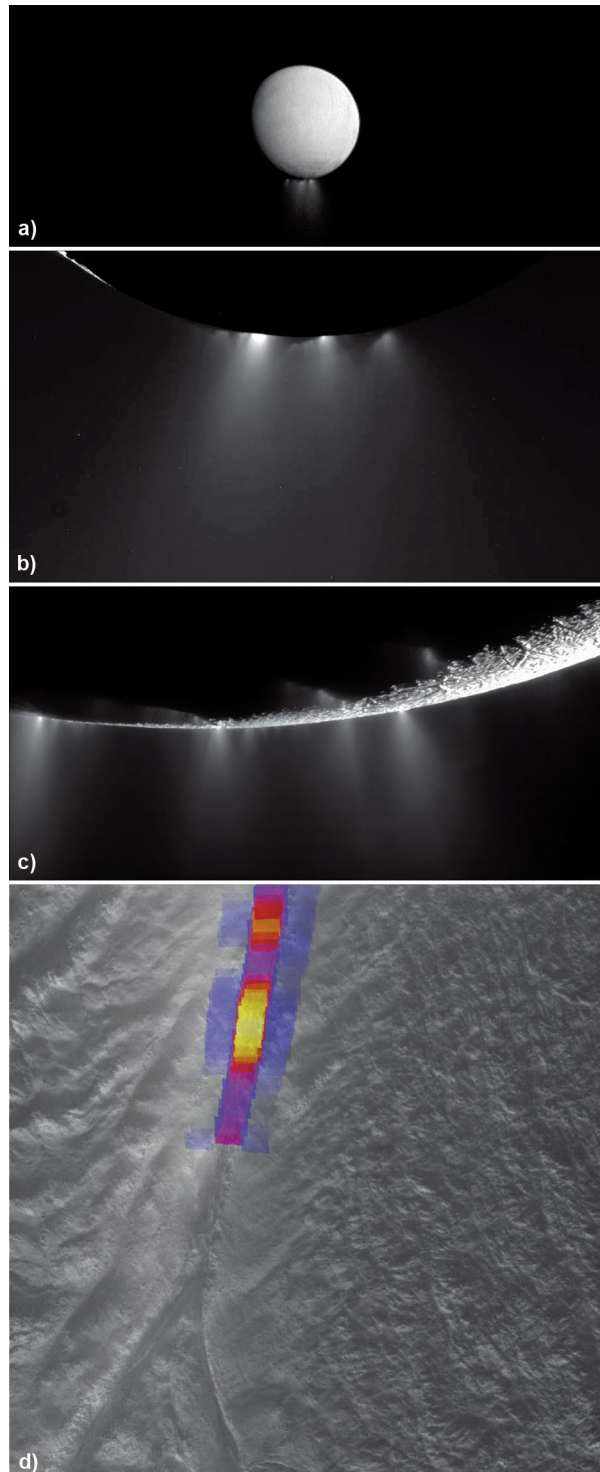
liarden Jahre alt sind. Dieses Nebeneinander unterschiedlich alter Regionen verdeutlicht Abbildung 8. Die dicht bekraterten Gebiete liegen in dieser Aufnahme nahe der Tag-Nacht-Grenze, während die Tagseite fast keine Einschlagskrater aufweist.

Tektonik hat mit der Zeit altes, dicht bekratertes Gelände allmählich in ein aus linearen Rillen und Gräben durchzogenes Gebiet umgewandelt, in dem die ursprünglichen Krater vollkommen verschwunden sind (Abbildung 9). Nicht nur tektonische Vorgänge verändern die Krater bis zum vollkommenen Verschwinden, sondern auch ein als viskose Relaxation bezeichneter Prozess. Durch einen erhöhten Wärmefluss werden insbesondere die großen Krater immer flacher und teilweise vollständig eingeebnet. Möglich ist dies, weil die Oberfläche nicht aus Gestein, sondern aus Eis besteht. Viskose Relaxation von großen Kratern ist auch auf Ganymed und Callisto zu beobachten [7]. Dass der Prozess auf einem fast zehnmal so kleinen Mond mit entsprechend niedrigerer Gravitation auftritt, weist auf einen deutlich erhöhten Wärmefluss im Vergleich mit den beiden größeren Jupitermonden hin [7].

Eine der bemerkenswertesten Entdeckungen der Cassini-Mission war der Nachweis von aktivem Kryovulkanismus auf Enceladus [3, 15]. Schon zu Zeiten der Voyager-Missionen kamen Überlegungen auf, dass Enceladus vulkanisch aktiv sein könnte. Damals vermutete man ausgestoßenes Material als Quelle für Saturns diffusen E-Ring [16, 17]. Mit Cassini konnte tatsächlich vulkanische Aktivität nachgewiesen werden. In mehr oder weniger regelmäßigen Abständen wurden mehrere Eruptionswolken oder Jets beobachtet, die ihren Ursprung in linearen Furchen in der Südpolregion von Enceladus haben. Sie erhielten die Bezeichnung Tiger Stripes [3]. Die Jets sind besonders deutlich im Gegenlicht der Sonne erkennbar und bestehen überwiegend aus Wasserdampf, durchsetzt mit Eispartikeln (Abbildung 10). Neben den beiden Kameras nahm das Infrarotspektrometer an Bord von Cassini die Eruptionsstellen auf und konnte Temperaturänderungen im Profil über die Ausbruchsstellen nachweisen. Abbildung 10d zeigt die Nachtseite von Enceladus im Saturnschein, überlagert mit farbkodierten Daten des Infrarotspektrometers. Direkt über der Damascus Sulcus genannten Eruptionsstelle liegen die Temperaturen (gelb und rot) bei 190 K, in der nächsten Umgebung (blau) nur bei 170 K.

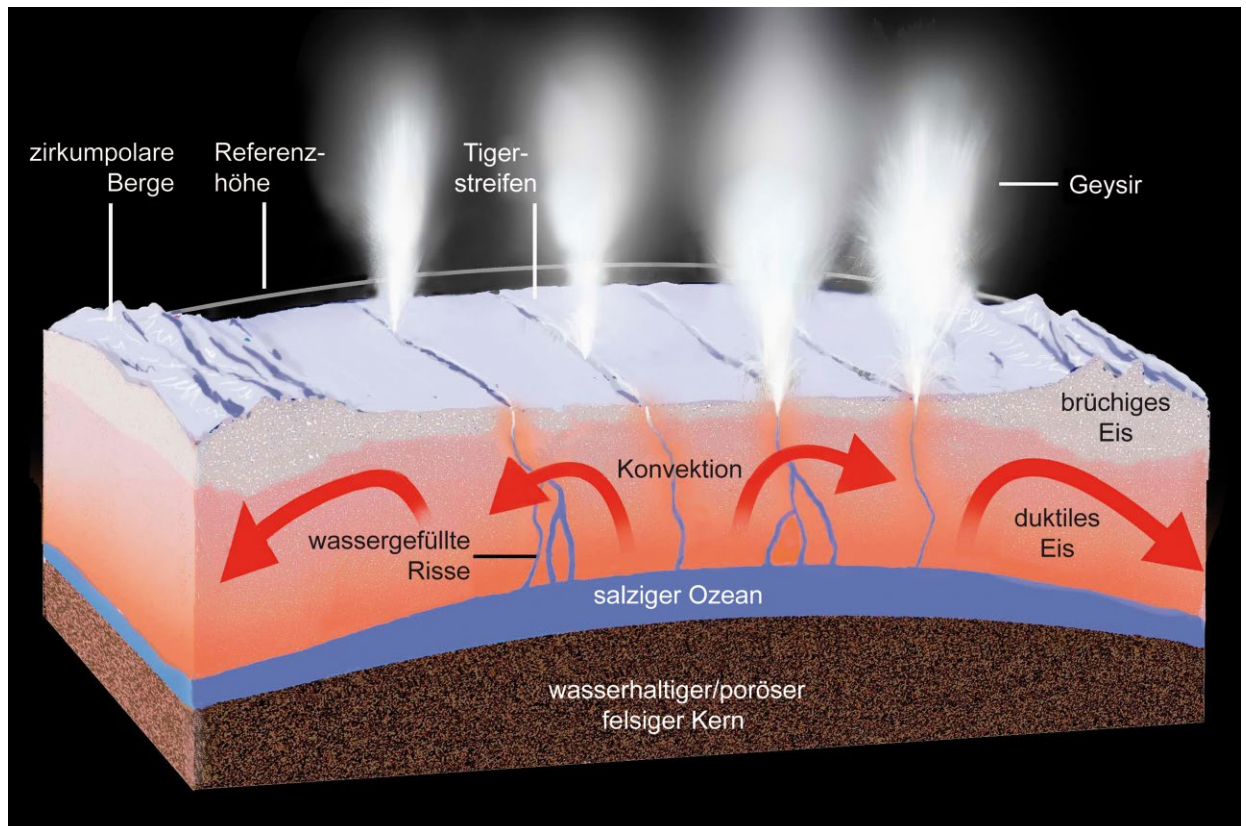
Die kryovulkanische Aktivität von Enceladus hat ihre Ursache überwiegend in Gezeitenwirkungen, zum einen bedingt durch die erzwungene Bahnexzentrizität dieses Mondes, zum anderen durch eine Bahnresonanz mit dem Mond Dione [18, 19]. Ein weiterer Effekt könnte in einem unbekannten Anteil von Ammoniak als Bestandteil des Materials unter der Oberfläche liegen, der die Schmelztemperatur herabsetzt. Hinweise darauf, wie der Vulkanismus zustande kommt, ergeben sich auch aus der inneren Struktur dieses Mondes.

In mehreren nahen Vorbeiflügen lieferte Cassini Informationen über den inneren Aufbau von Enceladus (Abbil-



**Abb. 10** Nachweis kryovulkanischer Aktivität in der Südpolregion von Enceladus. a) Eruptionswolken, b) in höherer Auflösung und aufgenommen während einer Verfinstderung der Sonne durch Enceladus. c) Detail der kryovulkanischen Aktivität in der Südpolregion, mehrere Ausbrüche (Jets) aus einer der linearen Bruchstrukturen sind dokumentiert. d) Detail der Bruchstruktur Damascus Sulcus in der Südpolregion auf der Nachtseite von Enceladus im Saturnschein. Daten des Infrarotspektrometers sind farbkodiert überlagert und dokumentieren die um etwa 20 K höheren Temperaturen entlang der Eruptionsstelle im Innern des Sulcus.





**Abb. 11** Modell des Inneren von Enceladus, dargestellt für die kryovulkanisch aktive Südpolregion.

dung 11). Demnach ist dieser Mond differenziert in einen relativ großen Kern aus Eis und Gestein mit vermutlich silikatischer Zusammensetzung und einer Dichte von etwa  $2500 \text{ kg/m}^3$  [18, 19]. Der Kern ist von einem flüssigen Wasserozean variabler Mächtigkeit von 20–50 km umgeben. Außen befindet sich eine Eiskruste, die etwa 20–30 km mächtig ist. Die Mächtigkeit der Kruste ist korreliert mit der Mächtigkeit des Ozeans: Am dicksten ist sie in der Äquatorgegend, am dünnsten in der kryovulkanisch aktiven

Südpolregion. Der Ozean dagegen ist in der Südpolregion am mächtigsten und weist am Äquator seine geringste Mächtigkeit auf.

Nicht eindeutig geklärt ist, ob die gegenwärtig beobachtete kryovulkanische Aktivität schon seit langer Zeit anhält oder erst in der jüngeren Gegenwart auftritt. Man vermutet, dass die Eiskruste isolierend wirkt, was ein allmähliches Ausfrieren des Ozean verhindert [18, 19]. Vulkanismus könnte, wie Modellrechnungen zeigen, episodisch stattfinden, in der Größenordnung über 100 Millionen bis 1 Milliarde Jahre [19]. Demnach wäre der rezent nachgewiesene Vulkanismus ein Prozess, der maximal während der letzten Milliarde Jahre aktiv war. Nicht geklärt ist ferner, wie lange die 2:1-Bahnresonanz mit Dione schon besteht, die ebenfalls zur Gezeitenaufheizung beiträgt. Zur Klärung dieser Fragen sind weitere zukünftige Missionen zum Saturnsystem und zu Enceladus erforderlich. Diese sollten neben beispielsweise einem Enceladus-Orbiter, Lander und/oder Penetrator auch ein Radarinstrument mitführen, das die tiefere Struktur der Eiskruste vermessen kann.

Planungen für solche zukünftigen Missionen zum Saturn und dessen Eismonde gibt es bei NASA und ESA. Doch keines dieser Missionskonzepte, die überwiegend auf die Erforschung des Enceladus und des größten Saturnmondes Titan fokussiert sind, wird derzeit konkret weiterverfolgt.

#### INTERNET

Voyager-Mission

[www.nasa.gov/mission\\_pages/voyager/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/index.html)

Galileo-Mission

[www.jpl.nasa.gov/missions/galileo](http://www.jpl.nasa.gov/missions/galileo)

Cassini-Mission

<https://t1p.de/nasa-cassini>

NASA Europa Clipper

[www.nasa.gov/europa](http://www.nasa.gov/europa)

ESA JUICE Mission

<https://sci.esa.int/juice>

NASA-Mission Dragonfly

<https://dragonfly.jhuapl.edu>

Eine Ausnahme ist die Mission Dragonfly der NASA. Sie hat lediglich Titan zum Ziel, dessen Eisoberfläche und mögliche Habitate mit einem völlig neuen Typus eines Landers erforscht werden sollen. Der Lander macht sich die Technik fliegender Drohnen zu Nutze und soll sich auf diese Weise bis zu mehrere hundert Kilometer weit über die Oberfläche bewegen können, Proben von unterschiedlichen Stellen entnehmen und diese analysieren. Am 27. Juni 2019 wählte die NASA diesen Missionsvorschlag zur Durchführung im Rahmen ihres New-Frontiers-Programms – dem auch die Pluto-Mission New Horizons angehört – aus. Die Dragonfly-Mission soll 2025/26 starten und nach etwa siebenjährigem Flug Titan im Jahr 2034 erreichen. Federführend ist das John Hopkins Applied Physics Laboratory in Laurel, Maryland (USA) (nähere Informationen siehe „Internet“).

Der zweite Teil im kommenden Heft stellt den aktuellen Forschungsstand zu den Eismonden von Uranus, Neptun und dem Zwergplaneten Pluto vor.

### Zusammenfassung

*Seit 40 Jahren erforschen Sonden die Eismonde im äußeren Sonnensystem. Die Vielfalt dieser Körper, die mögliche Existenz von verborgenen Ozeanen und ihr Kryovulkanismus machen sie zu äußerst spannenden Himmelskörpern. Teil 1 dieses Zweiteilers stellt die Eismonde von Jupiter und Saturn vor. Jeder dieser Eismonde zeigt sich geologisch als eigene Welt. Bei den Jupitertrabanten ist die Oberfläche von Europa im Vergleich zu Ganymed geologisch sehr jung. Magnetfeldmessungen der Galileo-Mission lassen unter der festen Eiskruste auf einen tiefen Ozean mit salzhaltigem Wasser schließen. Ein solcher Ozean existiert ebenfalls auf Callisto in größerer Tiefe, mutmaßlich auch auf Ganymed. Ganymed besitzt als einziger Eismond einen eisenhaltigen Kern, dessen starkes Magnetfeld das eines Ozeans überdeckt. Der Saturnmond Enceladus zeichnet sich durch aktiven Kryovulkanismus aus, der durch Gezeitenkräfte angetrieben ist.*

### Stichwörter

Eismonde, Jupitermonde, Saturnmonde, Io, Ganymed, Callisto, Europa, Enceladus, Magnetfeld, Gezeiten, Kryovulkanismus.

### Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

### Literatur

- [1] J. B. Dalton et al., Space Sci. Rev. **2010**, 153, 113.
- [2] H. Hussmann et al., in: Landolt-Börnstein, Group VI: Astron. & Astrophys., Vol. 4, Subvolume B – Solar System (Hrsg.: J. E. Trümper), Springer Nature Switzerland, Cham **2009**, S. 163 ff.
- [3] L. M. Prockter et al., Space Sci. Rev. **2010**, 153, 63.
- [4] R. T. Pappalardo et al., in: Jupiter (Hrsg. F. Bagenal), Cambridge Univ. Press, Cambridge **2004**, S. 363 ff.
- [5] B. A. Smith et al., Science **1979**, 204, 951.
- [6] B. A. Smith et al., Science **1979**, 206, 927.
- [7] P. M. Schenk et al., in: Jupiter (Hrsg. F. Bagenal), Cambridge Univ. Press, Cambridge **2004**, S. 427 ff.
- [8] J. M. Moore et al., in: Jupiter (Hrsg. F. Bagenal), Cambridge Univ. Press, Cambridge **2004**, S. 397 ff.
- [9] R. Greeley et al., in: Jupiter (Hrsg. F. Bagenal), Cambridge Univ. Press, Cambridge **2004**, S. 329 ff.
- [10] G. Schubert et al., in: Jupiter (Hrsg. F. Bagenal), Cambridge Univ. Press, Cambridge **2004**, S. 281 ff.
- [11] M. G. Kivelson et al., in: Jupiter (Hrsg. F. Bagenal), Cambridge Univ. Press, Cambridge **2004**, S. 13 ff.
- [12] F. Sohl et al., Space Sci. Rev. **2010**, 153, 483.
- [13] G. Schubert et al., Space Sci. Rev. **2010**, 153, 447.
- [14] J. R. Spencer, Science **2014**, 343, 148.
- [15] U. Köhler et al., Physik in unserer Zeit **2008**, 5(39), 220.
- [16] B. A. Smith et al., Science **1981**, 212, 163.
- [17] B. A. Smith et al., Science **1982**, 215, 504.
- [18] D. Hemingway et al., in: Enceladus and the Icy Moons of Saturn (Hrsg.: P. M. Schenk et al.), Univ. of Arizona Press, Tucson (Arizona) **2018**, Kap. 4.
- [19] F. Nimmo et al., in: Enceladus and the Icy Moons of Saturn (Hrsg.: P. M. Schenk et al.), Univ. of Arizona Press, Tucson (Arizona) **2018**, Kap. 5.

### Zusatzmaterial



### Zusatzmaterial

Den Zusatztext „Die Missionen Galileo und Cassini-Huygens zu Jupiter und Saturn“ finden Sie auf <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.201901562/supinfo> (Kurzlink <https://t1p.de/u2y9>) unter „Supporting Information“.

### Bildnachweise

Die Abbildungen stammen aus dem Planetary Photojournal der NASA ([photojournal.jpl.nasa.gov](http://photojournal.jpl.nasa.gov)) oder sind DLR-eigene Verarbeitungen der Kameras an Bord von Galileo oder Cassini.

### Der Autor



Roland Wagner war bis Juni 2019 Planetengeologe am Institut für Planetenforschung im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof. Er wertete als Associate Team Member des Galileo- und des Cassini-Projekts Bilder der Eismonde aus, mit Schwerpunkt auf Oberflächenformen, geologischen Prozessen und Altersbestimmungen mithilfe von Einschlagskraterhäufigkeiten.

### Anschrift

Dr. Roland Wagner, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Planetenforschung, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin-Adlershof.  
E-Mail: [roland.wagner@dlr.de](mailto:roland.wagner@dlr.de)